

Evolución de los equipos de decantación para estériles de mina: Del espesador convencional al de cono profundo para la producción de pasta.

Rodríguez Avello-Sanz, Ángel ^a; Butragueño Muñoz, José Antonio ^b; Grima Olmedo, Carlos ^c

^a ETS Ingenieros de Minas de Madrid, Calle Rios Rosas, 23 Madrid. angel.rodriguezavello@upm.es; ^b FLSmith S.A., Carretera de La Coruña km 17,8 Las Rozas-Madrid. jose.butragueno@flsmith.com; ^c ETS Ingenieros de Minas de Madrid, Calle Rios Rosas, 23 Madrid. carlos.grima@upm.es

RESUMEN

Los espesadores son equipos de separación sólido-líquido en los que una suspensión de sólidos formando una pulpa, se alimenta a un tanque provisto de un mecanismo interno que mediante la acción de la gravedad permite concentrar los sólidos en el fondo y hace fluir el agua clarificada hacia la superficie para ser recogida en el rebose del tanque. Por lo general las partes que integran estos equipos de sedimentación en esencia son las mismas desde los primeros diseños, si bien los equipos más modernos presentan avances y nuevas tecnologías aplicadas principalmente a los componentes que integran el mecanismo interno, lo que proporciona un mayor rendimiento en su operación. Con el paso de los años, los espesadores de lodos han experimentado una gran reducción en el tamaño y en el diámetro requerido para una misma tasa de alimentación de sólidos. Así como se ha desarrollado una alta eficiencia de los floculantes de polímeros sintéticos, se ha conseguido una reducción en el tamaño y diámetro de los espesadores comparados con los primeros diseños convencionales que no usaban floculante; y donde los modernos espesadores maximizan su efectividad con el uso de diversos sistemas de alimentación.

PALABRAS CLAVE: Espesadores, estériles, pasta, sedimentación, clarificado

1. INTRODUCCIÓN

Con el paso de los años los espesadores de lodos han experimentado una gran reducción en el tamaño y área de sedimentación requerida para igual caudal de alimentación de sólidos. La figura 1, muestra los diferentes equipos de espesado y las características principales de operación, destacando la progresión en la reducción de diámetro que han experimentado los espesadores, desde los de tipo “convencional” hasta los modernos diseños denominados de “alta capacidad”, “alta densidad” y “cono profundo o de pasta”. Esta reducción de tamaño de los equipos de espesado ha sido posible a dos grandes avances acontecidos en los últimos años: por un lado el desarrollo de floculantes sintéticos de alto rendimiento y por otro el diseño de sistemas de alimentación de alta eficiencia para la alimentación del espesador.

La mayoría de espesadores instalados en la industria minera desde hace años, especialmente desde 1990, han sido diseñados para operar con el empleo de floculantes poliméricos que mejoran el rendimiento del espesador y reducen sustancialmente el tamaño del equipo y por tanto la inversión de costes de capital. Los espesadores instalados hace más de 30 años pueden o no, haber sido diseñados para su uso con los modernos floculantes que existen actualmente en el mercado, pero la tendencia general hacia el incremento de capacidad de las operaciones, ha resultado en que estas unidades se han comenzado a operar con floculantes modernos y necesitan por tanto, de una reforma de su sistema de alimentación para aumentar su capacidad y adoptar las condiciones de operación óptimas de los nuevos floculantes. El coste del reactivo usado en la floculación, puede ser importante y en ocasiones representa un coste de operación alto. Por tanto, cualquier sistema que mejore la eficiencia del uso del floculante que contribuya a unos costes de operación menores para el proceso y la planta, deben de ser tenidos en cuenta por el operador.

Una de las claves para producir pasta o espesado de estériles en un espesador es asegurar que el diseño de la campana de alimentación y del sistema de dilución, si es necesario, del espesador proporcione las condiciones adecuadas de floculación.

Siguiendo la investigación y aplicación en esta área en los últimos años, uno de los fundamentos del diseño en los modernos sistemas de espesado, requiere un control importante de la floculación y también manejar de forma correcta cómo las partículas sólidas y el floculante son puestas en contacto durante la alimentación del espesador.







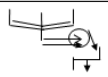
Geometría		Lecho Lodos	Tiempo Residencia de Lodos	Máximo diámetro (Aprox.)	Diseño Factor "K"	Capacidad de producción de pasta	%Sólidos hundido. (Típicos)
	Espesador convencional (~10°)	1 m	Medio	125 m	<30	No	1=Bajo (15-40%)
	Espesador HCT (~10°)	1 m	Medio	100 m	<30	No	1=Bajo (15-40%)
	Espesador HRT (~10°)	1 m	Medio	100 m	<30	No	1=Bajo (15-40%)
	Espesador de Cono 60° (Sin mecanismo)	2-6 m	Bajo	15 m	-	Si	2 (15-50%)
	Espesador de Alta Densidad HDT (~15°.20°)	3 m	Alto	100 m	>100	Si	3 (30-60%)
	Espesador de Cono Profundo (30-45° Cono)	8 m	Alto	50 m	>150	Si	4 (40-80%)
	Espesado y Filtración	-	-	-	-	Si	5=Muy alto (80-95%)

Figura 1 - Tipo de espesadores y características

2. LA EVOLUCIÓN EN EL DISEÑO DE LOS ESPESADORES

La práctica industrial de la concentración de sólidos por decantación y la producción de un rebose clarificado en el mismo equipo denominado “espesador”, data de 1907, en el que un recipiente circular cilíndrico incorporaba un sistema de rasquetas que acercaba el lodo decantado hacia el centro para su evacuación en forma de lodo, en tanto que el agua desbordaba por un canal periférico. Son los tanques “Dorr”, cómo se conoce a los primeros espesadores convencionales utilizados en la industria minera. En la figura 2, se muestra un espesador Dorr convencional de tanque de hormigón sobre el terreno.

En este tipo de espesadores se esperaba que el tiempo de retención de la pulpa fuese lo suficientemente largo, para permitir que todos los sólidos sedimentaran por gravedad, tal como se extrapolaba de la sedimentación inicial observado en el ensayo en probeta. Esta operación resultaba extremadamente lenta, lo que motivaba que solo pudieran estar rellenos con un 95% de líquido clarificado, y una pequeña capa de sólidos decantados en el fondo, con un bajo contenido en sólidos en el hundido.

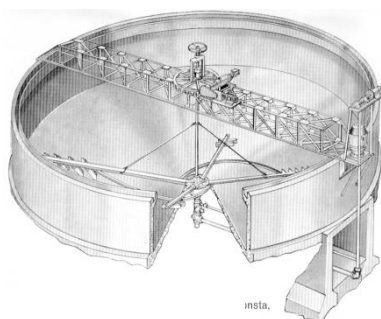


Figura 2 - Tanque de hormigón, sobre el terreno con túnel

La caída libre del sólido se regula por la ley de Stokes y su velocidad es proporcional a la diferencia de su densidad y la del líquido que le rodea y más significativamente al cuadrado del diámetro de la partícula. Cualquier acción que pudiera incrementar los parámetros anteriores, aumentará la sedimentación, y es por eso que los coagulantes y floculantes entraron a formar parte decisiva en el proceso de decantación y espesado: el uso de ciertas sustancias como goma, caliza, pegamento y otros agentes químicos tuvieron cierto éxito en los comienzos; pero en realidad, con la invención y desarrollo de los polielectrolitos sintéticos es cuando se producirá una nueva dimensión y avance en la práctica de la floculación. Los ratios de sedimentación podían ser incrementados por diez, veinte o más veces, y por primera vez materiales de difícil decantación comienzan a poder ser sedimentados con cierta rapidez.

Los usuarios de los equipos de sedimentación respondieron con el incremento de la producción en tanques de sedimentación convencionales con un margen sustancial, generalmente de tres a cinco veces más grandes comparado con las prácticas de espesado anteriores a la primera mitad del siglo XX.

La aceptación de la industria minera y metalúrgica de mecanismos de espesado mucho mayores y su funcionamiento efectivo con floculantes específicos, llevó a la investigación para sacar mayor provecho sobre el efecto y condiciones de utilización, circunstancia que ya se conocía en el laboratorio, pero que sólo a partir de los años 70 se puso en práctica con la introducción de los espesadores de “alta capacidad” (“High Capacity Thickener” = HCT, o también “High Rate Thickener” =HRT).

En el desarrollo de estos equipos, primero se consideró la eficiencia y el uso económico de los floculantes. Las sobredosis de reactivos podrían alcanzar los resultados deseados pero en muchos casos resultaban muy costosos. En segundo lugar, con tiempos de retención cortos, la claridad del rebose podía sufrir una merma en su calidad y claridad, resultando en grandes pérdidas de material por el rebose. En tercer lugar, a la vista de que los flujos de alimentación son menos uniformes, y con cambios bruscos, era primordial diseñar un sistema de alimentación que regulara estas variaciones. Finalmente sería necesario un equilibrio razonable entre la capacidad del equipo y la densidad del hundido requerida.



Figura 3 - Comparativa de espesador “Convencional” y “HRT”

Las pruebas con este nuevo diseño Eimco HRT tuvieron lugar en el laboratorio con una unidad de 0.3 m de diámetro, seguida de plantas piloto, casi industriales, de 1.5 m de diámetro, para finalizar con una unidad piloto de 2.4 m de diámetro y 2.1 m de profundidad, que fue probada en campo primeramente con estériles de carbón y posteriormente con otras pulpas de distintas aplicaciones, en circuitos simples o de decantación a contracorriente (CCD).

Tabla 1 - Resultados de los ensayos en estériles de carbón

Planta	% Sólidos peso	Carga m ² /tpd	Ratio ascensional m/h	% Sólidos hundido	Polímero (ppm)
Núm. 1	2-4	0.09-0.13	12,2-15.8	33-37	10-16
Núm. 2	9-12	0.09-0.12	3.6-4.9	34-39	20-30
Núm. 3	8-15	0.03-0.07	3.9-19.7	29-35	13-20
Núm. 4	6-8	0.04-0.07	6.6-8.5	25-35	1-10

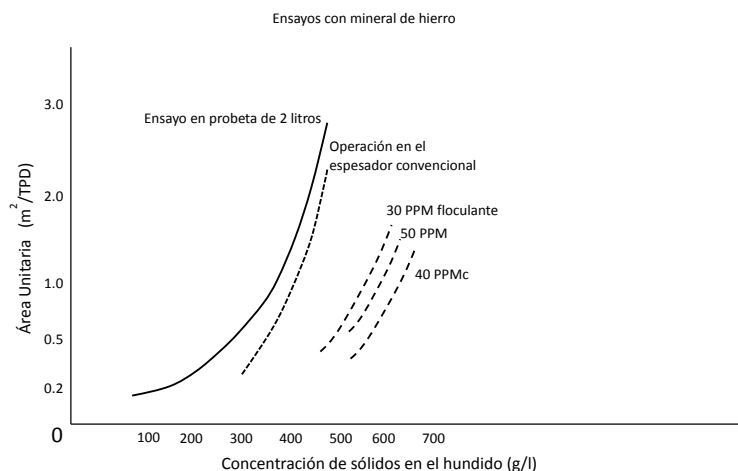


Figura 4 - Resultados de la planta piloto con estériles de mineral de hierro

En resumen, el desarrollo de los espesadores de “alta capacidad” ha mostrado que con su modo de operación y características se obtienen importantes beneficios y se optimiza el uso de flocculante, principalmente por los siguientes factores:

- Se produce una mezcla rápida entre el flocculante y la pulpa.
- La adición por etapas del flocculante se debe realizar en al menos tres etapas.
- La introducción de los sólidos flocculados se hace en la parte superior del lecho de lodos para una máxima flocculación y mejor claridad del rebose.
- En la zona de placas inclinadas y en la parte superior de la entrada de la alimentación se produce la ruptura de las fluctuaciones que pudieran existir en la alimentación.
- Suficiente volumen de compresión sobre la entrada de la alimentación proporciona mayor densidad del hundido.
- Existe un mayor par de arrastre en las rasquetas al manejar una mayor carga por unidad de área.

Por todo ello, los espesadores de “alta capacidad” (HCT/HRT) representaron una respuesta a la escalada en los costes de inversión de los grandes equipos convencionales que encontraron un uso creciente en diversos campos de la minería. El diseño HCT /HRT optimiza la efectividad en el desarrollo de la operación de espesado, mientras se minimizan los costes de inversión y los costes de operación.

En la tecnología del espesado de estériles existe otra serie de equipos importantes por su utilización en esta tarea y que se operan actualmente. Estos equipos son los espesadores de “alta densidad” conocidos como HDT (High Density Thickener = HDT). Constituyen una tecnología moderna aparecida y desarrollada coincidiendo con el uso general de sistemas de alimentación con dilución y el empleo de flocculantes a base de polímeros.

Tabla 2- Comparación espesador HDT frente a Convencional con mineral de uranio

Mineral de Uranio Neutralizado		
Medición	Espesador HDT	Espesador Convencional
Área Unitaria (m ² /tpd)	0.03-0.07	0.01-0.06
Ratio ascensional (m/h)	0.7-2.0	-
Sólidos hundido (% peso)	51-63	45-65
Floculante (libras/t sólido)	0.012-0.026	-
Sólidos en rebose (PPM)	105-170	-
Precipitado de solución ácida		
Medición	Espesador HDT	Espesador Convencional
Área Unitaria (m ² /tpd)	0.6-1.4	8.4
Ratio ascensional (m/h)	0.5-1.5	-
Sólidos hundido (% peso)	4-8.5	4.0
Floculante (libras/t sólido)	0.13-0.53	-
Sólidos en rebose (PPM)	132-489	300



Figura 5 - Espesador convencional y “HDT”

Los espesadores HDT de alta densidad en el hundido, se comenzaron a desarrollar para ir sustituyendo a los espesadores convencionales y de alta capacidad en el tratamiento de los estériles mineros, a medida que las necesidades de tratamiento crecían con los grandes yacimientos puestos en operación en los últimos años. Su aplicación surge con la necesidad de eliminar una mayor cantidad de agua en las pulpas de estériles con grandes ratios de alimentación de sólidos en forma de pulpa. Por tanto, era necesario desarrollar un equipo que alcanzara mayores tasas de sólidos en el hundido capaz de tratar grandes tonelajes pero sin un coste de inversión excesivo.

Al desarrollarse los espesadores HDT con sistemas de alimentación más eficientes, se comprobó que el equipo producía en el hundido unos lodos espesados con alta tensión de fluencia, que era la necesaria para facilitar la deposición de los estériles y a la vez, se recuperaba una mayor cantidad de agua que con otros sistemas convencionales y de alta capacidad.

Estos espesadores no llegan a alcanzar una pasta en los lodos del hundido, como en el espesador de cono profundo, pero consiguen considerables concentraciones de sólidos en el hundido y una tensión de fluencia elevada, dando como resultado un fluido no-newtoniano. Hoy en día, para el tratamiento de estériles se usan ambos equipos, y la elección dependerá de los caudales de alimentación y las características necesarias en los lodos espesados para su deposición o tratamiento posterior.



Espesador	Sistema de Alimentación	Hundido Tensión Fluencia	Tanque Talud	"K" Par
Convencional	Sin dilución	Bajo	2°- 5°	K <50
HRT	Con dilución	Bajo	2°- 10°	K <50
HDT	Con dilución	Moderado	8°- 15°	K <125
Cono Profundo	Con dilución	Alto	30°- 45°	K >200

Figura 6 - Características de espesadores convencional, HRT, HDT y de cono profundo

3. TECNOLOGÍA DEL ESPESADO EN PASTA

A principios del siglo XX, se desarrollaron los primeros espesadores de cono para el espesado de estériles, que finalmente han evolucionado en el espesador de cono profundo actual para la producción de pasta. Estos equipos tenían la característica de disponer de una altura lateral mucho mayor que los espesadores convencionales, lo cual permitía un alto lecho de lodos en su interior, mucho mayor comparado con otros espesadores de la época. Así los primeros conos profundos aparecidos y patentados en Estados Unidos, por ejemplo la patente 854,520 sobre el "Callow Cone" del año 1907, que se muestra en la figura 7.

No es hasta mediados de los años 50 cuando surge una nueva patente en Alemania, con el número 749,736 del año 1953 donde se muestra un equipo que mejora la separación sólido-líquido mediante la sedimentación, representado en la figura 8.

Este equipo consiste en un espesador con una geometría similar al espesador de pasta actual, pero basado en los mismos principios que sus predecesores: mantener un lecho de lodos de gran profundidad.

Es a principios de los años 60 cuando se comienza a estudiar en serio la posibilidad de realizar equipos que hoy pueden considerarse como el inicio de los espesadores de pasta actuales. Es en el Reino Unido, con la aplicación y la investigación en el National Coal Board, donde comienzan a instalarse espesadores de forma cónica con dimensiones de 4.2 metros de diámetro y 6 metros de profundidad, provistos de rasquetas internas, donde se conseguirán con estériles de carbón densidades del hundido de hasta el 55-65% de sólidos en peso y que son capaces de descargar el hundido sobre cinta transportadora.

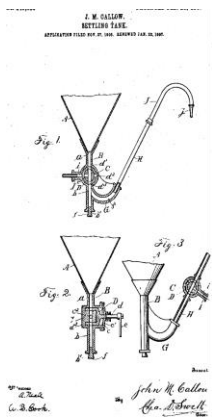


Figura 7 - Callow Cone; patente 854,520. EE.UU

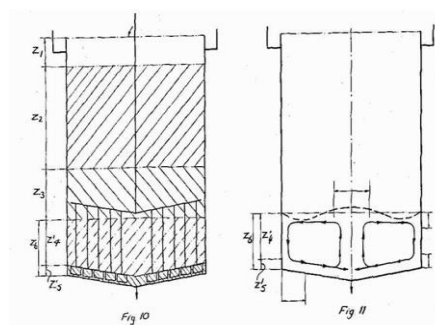


Figura 8 - Espesador de lecho profundo año 1953. Alemania.

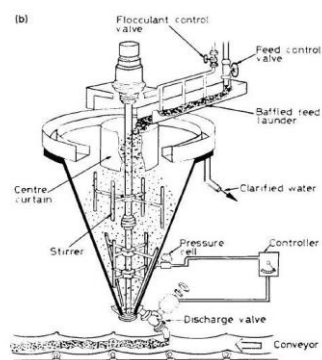


Figura 9 - Espesador de cono profundo del National Coal Board.

Sin embargo en esta época, se reconocen los aspectos críticos que deben ser controlados en los espesadores de cono profundo y que afectan a los resultados de la operación, como son: una floculación efectiva, un sistema de alimentación de alto rendimiento, una mayor inclinación del fondo y un sistema eficaz de piquetas internas para liberar el líquido atrapado en el lecho de lodos sedimentado.

Otro avance significativo en el desarrollo de los espesadores de cono profundo, fueron las investigaciones realizadas por la compañía de aluminio Alcan. Esta empresa desarrolló y patentó sus propios espesadores de cono profundo para sus procesos de espesado de alúmina. Sus investigaciones comenzaron en los años 70, en Jamaica y Canadá, con el objetivo de espesar los lodos rojos del proceso de tratamiento de la bauxita.

En este caso el modelo sería un espesador de cono profundo igual a los espesadores de pasta actuales, con dimensiones de 10 metros de diámetro y 14 metros de altura lateral en la virola, que llevaba incorporada un mecanismo de rasquetas, y con el cual se obtenía un contenido en sólidos en el hundido del 30-21% en peso frente al 15-17% que se obtenía en los espesadores convencionales. En el año 1993, Alcan tenía en sus factorías de alúmina 30 equipos de espesadores de cono profundo operando en sus instalaciones.

El espesador Alcan Deep Thickener fue introducido por EIMCO (ahora FLSmidth) en aplicaciones fuera del campo de la alúmina, en 1996 bajo licencia, siendo comercializado como espesador de Cono Profundo Eimco.

El equipo estándar tiene rasquetas interiores y el ratio de altura/diámetro típico de 1 a 2 con un talud del cono inferior que varía entre 30° y 45°, y que varía según sea la geometría del tanque y la naturaleza del lodo a tratar. Esta geometría le proporciona una alta compresión de la capa de lodo y un elevado lecho de lodos, consiguiendo así alcanzar la máxima concentración de sólidos en el hundido, llegando al denominado rango de “pasta”.

La etapa de introducción del equipo para el tratamiento de estériles en las operaciones mineras, no resultó fácil en un primer momento por las desconfianza inicial de los clientes y operadores a adquirir un equipo que tenía un coste capital muy superior al de otros equipos de espesado (HCT/HRT, HDT), pero que sin embargo era capaz de proporcionar muchos beneficios en la operación del espesado de los estériles de planta y en la recuperación de las aguas de proceso. Sin embargo, hoy ha sido reconocido como una de las mejores tecnologías disponibles en esta área.

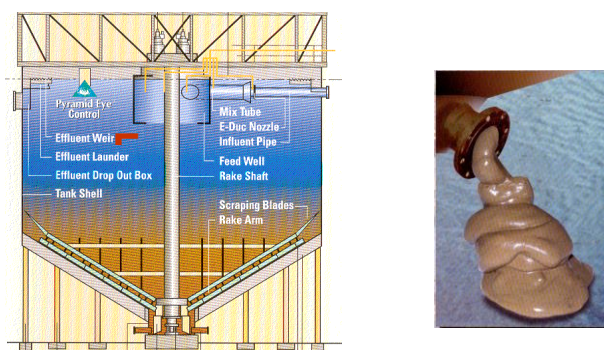


Figura 10 - Espesador de cono profundo Eimco y espesado en pasta

En la figura 11, se observan las principales diferencias y características de los equipos dedicados a la operación de espesado de estériles relacionados anteriormente.

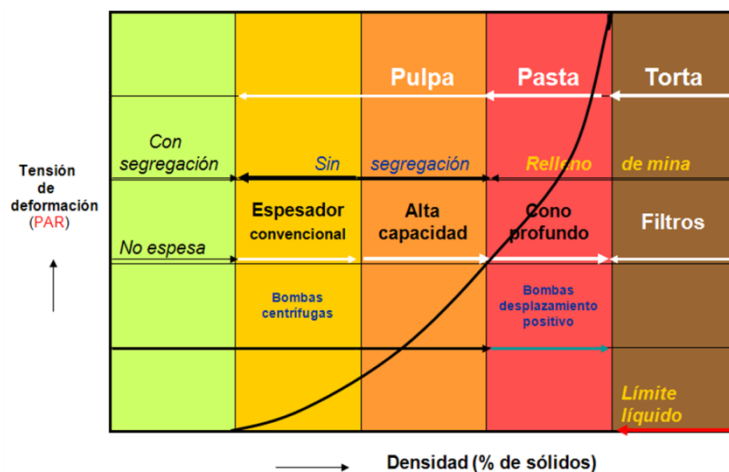


Figura 11 - Tensión de fluencia en los espesadores de estériles.

Para establecer unos límites aproximados de la tensión de fluencia alcanzada en cada uno de los tipos de equipos, se pueden considerar los datos siguientes:

- Espesadores convencionales y de alta capacidad HCT/HRT: donde la tensión de fluencia se situaría entre 0 y 50 Pa, con un contenido en sólidos del hundido máximo de 30-45%, dependiendo de las características del sólido a tratar.
- Espesadores de alta densidad del hundido HDT: con una tensión de fluencia situada entre 50 y 150 Pa, con una concentración en el hundido de entre 40-65% como máximo.
- El último grupo serían los espesadores de cono profundo donde se alcanzan tensiones de fluencia en el hundido desde 150-200 Pa hasta más de 500 Pa, y donde se puede alcanzar concentraciones del hundido desde 60% hasta el 80%.

4. APLICACIONES DEL ESPESADOR DE CONO PROFUNDO

Algunas de las aplicaciones típicas para este tipo de equipos de espesado de alta densidad o espesado en pasta son:

- El espesado de estériles para apilado en superficie o relleno de mina.
- La decantación a contracorriente.
- La alimentación de pulpas a la sección de filtración.
- La alimentación a autoclaves.

En la figura 12 se muestra el diagrama de flujo de un espesador produciendo una pasta para su apilado en superficie. El espesador de pasta, recibe un flujo de alimentación de estériles y sedimenta los sólidos hasta conseguir una concentración del hundido que sea óptima para este tipo de depósitos.

Las bombas centrífugas son las encargadas de evacuar los sólidos del hundido o la pasta del espesador. Sin embargo en ocasiones y debido a la viscosidad de la pasta obtenida, puede hacerse necesario la utilización de bombas de desplazamiento positivo, sobre todo en el caso que el destino final de los lodos sea a mayor distancia que 100 metros desde la base del espesador. En la balsa de lodos la pasta se distribuye de una determinada forma que depende de la orografía del terreno y de las condiciones de apilado requeridas.

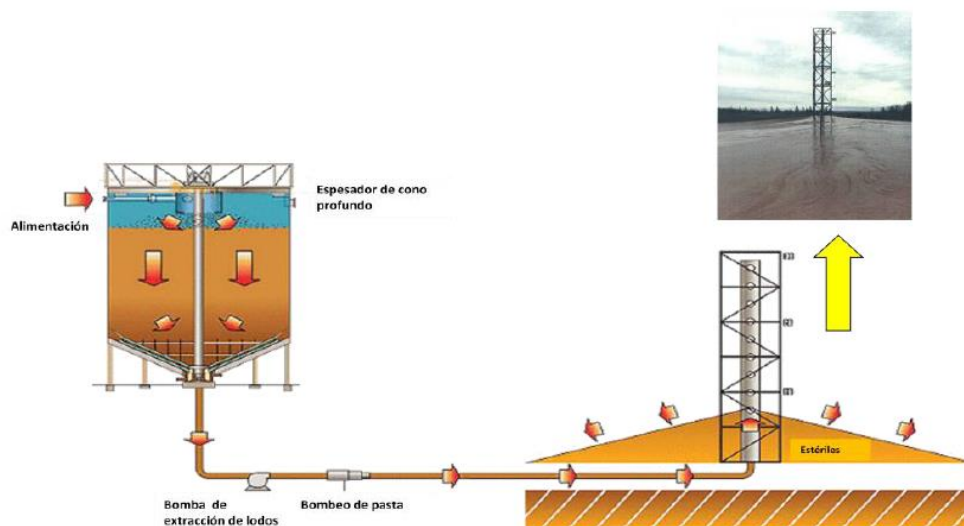


Figura 12 - Flujo de un espesador de pasta para apilado en superficie.

En cuanto a las ventajas ambientales del apilado de estériles espesados de alta densidad comparado con las balsas u operaciones de espesadores convencionales, se listan en la tabla 3.

Tabla 3 - Comparación entre balsa convencional frente a depósitos de lodos espesados en forma de pasta

	Balsa de lodos convencional	Depósitos de lodos espesados
Volumen de almacenamiento	Gran volumen con el 20-25% sólidos	1/6 parte del volumen convencional al 60% de sólidos
Agua en el almacenamiento	Requiere presa de retención de aguas	No requiere presa, sólo apilado
Riesgo de rotura de la presa	Alto riesgo	Bajo o mínimo riesgo
Ahorro de agua	No efectivo, gran pérdida por evaporación	El agua se recupera en planta
Contaminación de acuíferos	Severo	Bajo o nulo
Riesgo de licuefacción de los estériles	Alto riesgo	Bajo Riesgo
Uso del terreno tras el cierre de la mina	Dificultad en la restauración del terreno	El drenaje de la superficie facilita la recuperación del terreno

5. CONCLUSIONES

Dentro del conjunto de equipos y tecnologías existentes para el espesado de estériles y lodos generados por las operaciones mineras, así como el estudio del diseño, mejoras y métodos empleados para la deposición de estos lodos y la recuperación del agua contenida en ellos, están ganando un creciente interés los espesadores de cono profundo para pasta y los espesadores de alta densidad en el hundido (HDT) debido al creciente interés del sector minero en la gestión y manejo de estos estériles y las necesidades crecientes de agua en las explotaciones mineras. Es reconocido que la reutilización del agua de proceso es esencial para la sostenibilidad de las explotaciones de acuerdo a las normativas y regulaciones locales y gubernamentales y también para la sostenibilidad económica y social de la operación.

Las teorías y tecnologías que históricamente se han ido desarrollando para explicar el fenómeno del espesado de materiales y su evolución desde los primeros espesadores de finales del siglo XIX hasta llegar a los modernos espesadores de pasta es debido fundamentalmente a los avances en la industria de los flocculantes y en el desarrollo de sistemas de alimentación, dilución y mezcla con una alta eficiencia.

BIBLIOGRAFÍA

- Slottee S.; State of Art Deep Cone Paste. Generating Thickener Systems for Processing Mineral Tailings. 2002. Eimco Process Equipment Co.-Salt Lake City-USA. Internal Report.
- Slade N.; Kuyucak, N.; Tailings thickening to reduce impacts on water resources. International Mining April 2009. Golder Associates.
- MacNamara L.; Conveying the Future of Paste. FLSmidth. International Mining April 2009.
- Emmett R.C.; Laros T.J.; et al.; The Eimco E-Duc system for Flocculant Optimization in Thickeners. Eimco Process Equipment Co. Internal Report. 1994
- Laros T.J.; E-Duc Design and Standardization. Eimco Process Equipment. Internal Report. 1995
- Moolman P.; Vietti A.; Tailings disposal an approach to optimize water and energy efficiency. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Platinum 2012.
- McIntosh A.; Thickener Sizing and the Importance of Testwork. Outotec. 2009
- FLSmidth; Improving Densification of Fine Coal Refuse to Eliminate Slurry Ponds. FLSmidth Technical Progress. Internal Report. 2008.
- Eimco Process Equipment Co.; Clarifier and Sludge Thickener Sales Manual; Eimco. 1989.